УДК 621.1-1/-9

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ ТИПОРАЗМЕРНОГО РЯДА ТУРБОКОМПРЕССОРОВ ДЛЯ ДВС РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF METHODS OF CREATING VARIANTS OF TURBOCHARGERS FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES FOR VARIOUS PURPOSES

В. Н. Каминский, *доктор технических наук, профессор;* ***Р. В. Каминский,*** *кандидат технических наук;* ***С. В. Сибиряков; И. Н. Григоров, Е. А. Костюков, А. В. Лазарев*** *– аспиранты*

АО «НПО «Турботехника», г. Протвино

В статье рассматривается один из важнейших аспектов научного направления деятельности НПО «Турботехника» – создание и внедрение оригинальной методики, позволяющей ускорить процесс разработки, конструирования, испытаний и изготовления широкой гаммы конкурентоспособных агрегатов наддува для двигателей различного назначения, а также повысить эффективность и рентабельность производства. Рассказывается об исследованиях, предшествовавших формированию концепции методики, об этапах ее создания, особенностях и практике применения для решения актуальных научно-практических задач в сфере двигателестроения.

Ключевые слова: методика, турбокомпрессор, типоразмерный ряд, двигатель внутреннего сгорания, турбонаддув

V. N. Kaminsky, *Doctor of Technical Science, Professor;* ***R. V. Kaminsky,*** *Candidate of Technical Science;* ***S. V. Sibiryakov; I. N. Grigorov, E. A. Kostyukov, A. V. Lazarev*** *– postgraduats*

Scientific-Production Association Turbotekhnika (Protvino)

The article covers one of the most important aspects of scientific activity of Scientific-Production Association Turbotekhnika: creation and implementation of original technique which makes it possible to accelerate the process of design, construction and production of wide range of competitive turbochargers for engines of various purposes, as well as to improve efficiency and profitability of production. The article also describes the research which preceded the forming of the technique concept, the stages of its creation, its features and practice of its application for solving relevant scientific-practical tasks in the area of engine industry.

Keywords: the technique, turbocharger, standard series, an internal combustion engine, turbochargersystem

Введение. Потребность в формировании концептуально новых методологических решений со всей очевидностью определилась в условиях непрерывно меняющихся требований к изделиям и их компонентам, расширения системы лицензирования производственного процесса. Крайне важна и необходима адекватная локализация составляющих конечного продукта. На динамичном и противоречивом рынке силовых агрегатов весомую позитивную роль должно сыграть наличие широкой гаммы конкурентоспособных турбокомпрессоров (далее – ТКР) для двигателей внутреннего сгорания (далее – ДВС).

В настоящее время практически 100% дизельных двигателей оснащено системой наддува, а тенденции развития бензиновых двигателей предпо-

лагают по соображениям энергоэффективности сокращение рабочего объема и расхода топлива при сохранении мощности, что также возможно только при применении наддува.

Стремительность научно-технического прогресса и появление новых технологий показали необходимость ревизии существующих методик, применяемых в создании агрегатов наддува. В связи с развитием отечественных двигателей, а также все более ужесточающимся экологическим законодательством при обязательном применении и изменении конфигураций ТКР в зависимости от изменения экологического класса двигателей становится очевидной потребность в методике, позволяющей оперативно реагировать на вызовы, связанные с созданием агрегатов наддува.

Важность разработки современной отечественной методики обусловлена еще и тем, что западные производители ТКР не публикуют собственных методик и держат в секрете свои ноу-хау, а инжиниринговые фирмы, специализирующиеся на разработке двигателей, располагают обширной базой данных и используют готовые решения.

С целью эффективного удовлетворения потребностей динамичного рынка в НПО «Турботехника» была поставлена и успешно решена задача разработки и внедрения в производство комплексной инженерной методики для создания полной гаммы агрегатов систем турбонаддува (ТН) на ДВС различного назначения: автомобильных, тракторных, комбайновых, судовых, тепловозных и специальных.

Процесс создания методики

Достижение поставленной цели потребовало проведения углубленного анализа российского и зарубежного опыта создания и использования систем наддува ДВС, включая методологический аспект. Анализировался опыт ведущих предприятий России, таких как: ПАО «КамАЗ»), ООО «Челябинский тракторный завод – УРАЛТРАК» (ЧТЗ); Белоруссии – ОАО «Борисовский завод агрегатов» (БЗА), Украины – ОАО «Дергачевский завод турбокомпрессоров» (ДЗТ), а также компаний Европы и США – Honeywell, BorgWarner Turbosystems, Cummins Turbo Technology, ABB, AVL, FEV, IAV и др.

Круг исследований включал методические материалы по созданию систем ТН и сами системы ТН к двигателям различного назначения с последующей их реализацией в гамме типоразмеров от ТКР-40 до ТКР-200.

Кроме того, был разработан единый цикл проектирования семейства ТКР, их испытаний и подготовки производств; разработаны и созданы специализированные стенды для исследований и испытаний ТКР на современном уровне с использованием новых методов регистрации параметров, обработки и интерпретации экспериментальных данных; апробирован разработанный цикл проектирования семейства ТКР и подтверждено его соответствие последующей подготовке серийного производства с использованием современных технологий и широкой кооперации, в том числе международной.

Отечественная методика базируется на фундаментальных трудах по гидро- и газодинамике, в первую очередь, советских ученых – Б. С. Стечкина, А. С. Орлина, М. Г. Круглова, А. Э. Симсона, Г. Ю. Степанова, А. Е. Дейча и других.

Методы создания, доводки и производства долгое время были достоянием ограниченного круга специалистов из соображений безопасности технологий товаров двойного назначения и конкуренции.

Велик вклад в развитие ТН зарубежных ученых, таких как Ф. Бенсон, В. Вудс, Г. Лист, А. Пишингер, М. Циннер, Г. Вошни и многих других. В нашей стране также были выполнены масштабные практические работы по созданию отечественных турбокомпрессоров и внедрению турбонаддува в автомобильной и тракторной отраслях. В этом большая заслуга таких советских ученых и конструкторов как Б. П. Байков, П. В. Иванов, Р. С. Дейч, Ю. Б. Моргулис, Г. М. Поветкин, В. Н. Каминский, А. Б. Азбель, И. А. Коваль, Г. М. Поляковский, Ю. П. Волошин, Н. С. Ханин, П. Л. Озимов, Э. В. Аболтин, Б. Ф. Лямцев, В. Е. Виняр, А. Н. Шерстюк, Д. А. Дехович и многих других специалистов. К настоящему времени этими школами, зарубежными компаниями AVL, FEV, Ricardo и пр., а также техническими университетами Граца, Ахена, Берлина, Штутгарта и др. выполнено множество разработок, что позволило создать работоспособные и высокоэффективные системы ТН и тиражировать их миллионами экземпляров для эксплуатации во всем мире. Это позволило сформулировать задачи по инжинирингу ТКР в России, наметить рациональные типоразмерные ряды и масштабы, проработать нетрадиционные перспективные решения. По результатам анализа методик приняты конкретные задачи исследования.

В последние годы в мире налицо значительные достижения: с одной стороны, в точности расчетов, грамотности проектирования, тонкости и скорости многопараметрового регулирования, с другой – в материаловедении, технологиях изготовления, обработки, охлаждения и смазки напряженных элементов конструкции. Турбонаддув в настоящее время – один из основных способов достижения таких показателей и удовлетворения экологических норм, что подтверждается динамикой мирового развития разновидностей ТН, производства и использования

агрегатов. Именно поэтому была поставлена задача анализа имеющегося опыта с последующей концентрацией усилий на методичном создании недостающих (или обновлении устаревших) компонент технологии решения задач в реальных условиях.

Аналитические исследования российского и международного опыта по разработке, оценке, доводке и производству систем ТН в зависимости от области применения двигателей, их реального использования в мире, практические исследования образцов и их элементов позволили обновить видение положительных и отрицательных сторон различных подходов. При этом исследования подтвердили, что зарубежные современные методики и средства проектирования существенно отличаются от «классических» методик, где применяются сложные расчеты рабочего процесса двигателя, профилирование проточных частей, расчет ходовой части и устаревшие методы прототипирования, где при изготовлении в основном использовались серийные технологии.

Важнейшими направлениями данной работы стали теоретические изыскания – расчеты и подбор схем ТН, элементов проточных частей ТКР для конкретных двигателей, в зависимости от их назначения и требований к ним, а также экспериментальные исследования и испытания на специализированных стендах и двигателях.

В результате системного подхода к решению поставленных задач удалось создать оригинальную инженерную методику разработки и постановки на производство турбокомпрессоров для наддува двигателей. С помощью масштабирования элементов лопаточных машин на основе широкого использования базы данных и экспериментальных зависимостей определены диапазоны масштабирования элементов лопаточных машин при разбивке всей гаммы агрегатов наддува на две группы в зависимости от расхода воздуха или газа и даны коэффициенты моделирования по расходу и линейным размерам.

Была достигнута высокая степень сходимости результатов расчетных и экспериментальных исследований, что подтвердило их достоверность. Таким образом, подготовлены, отлажены и внедрены в практику комплексные инженерные методики разработки и доводки конструкции агрегатов наддува, позволяющие оперативно создавать и запускать в производство высокоэффективные агрегаты наддува, обеспечивающие необходимые показатели двигателей в зависимости от их назначения.

Результатом работы стало внедрение методики в Научно-производственном объединении «Турботехника» и ее применение при разработке и изготовлении ТКР, которые поставляются практически на все моторостроительные заводы страны. Ее отсутствие приводило к распылению и без того ограниченных ресурсов, к существенному отставанию от мировых конкурентов и к необходимости закупок образцов и даже серийных поставок для большинства моторных заводов, включая те, что располагают собственным производством таких агрегатов. Это – чувствительные вопросы технологической безопасности.

Содержание и практика применения методики

Как уже отмечалось, созданная в НПО «Турботехника» методика позволяет оперативно решать задачи создания агрегатов наддува для двигателей различного назначения (рис. 1). Ниже рассматриваются основные характеристики методики и особенности ее применения на практике.

На первом этапе анализируется техническое задание на двигатель. С помощью программы «Параметры наддува дизеля», реализованной в среде MicrosoftExcel, проводится тепловой расчет двигателя. В программе реализовано упрощенное моделирование цикла ДВС, позволяющее оценить расход воздуха и степень наддува, необходимого для достижения заданных параметров двигателя; параметры газа до и после турбины.

При первичном расчете на основе имеющихся технических данных двигателя, информации из технической литературы или эмпирических формул, полученных путем статистического анализа экспериментальных данных различных двигателей, формируется внешняя скоростная характеристика двигателя. Минимально необходимая информация для выполнения первого этапа расчёта – протекание крутящего момента и удельного эффективного расхода топлива двигателя по ВСХ.

Рис. 1. Блок-схема методики создания турбокомпрессоров

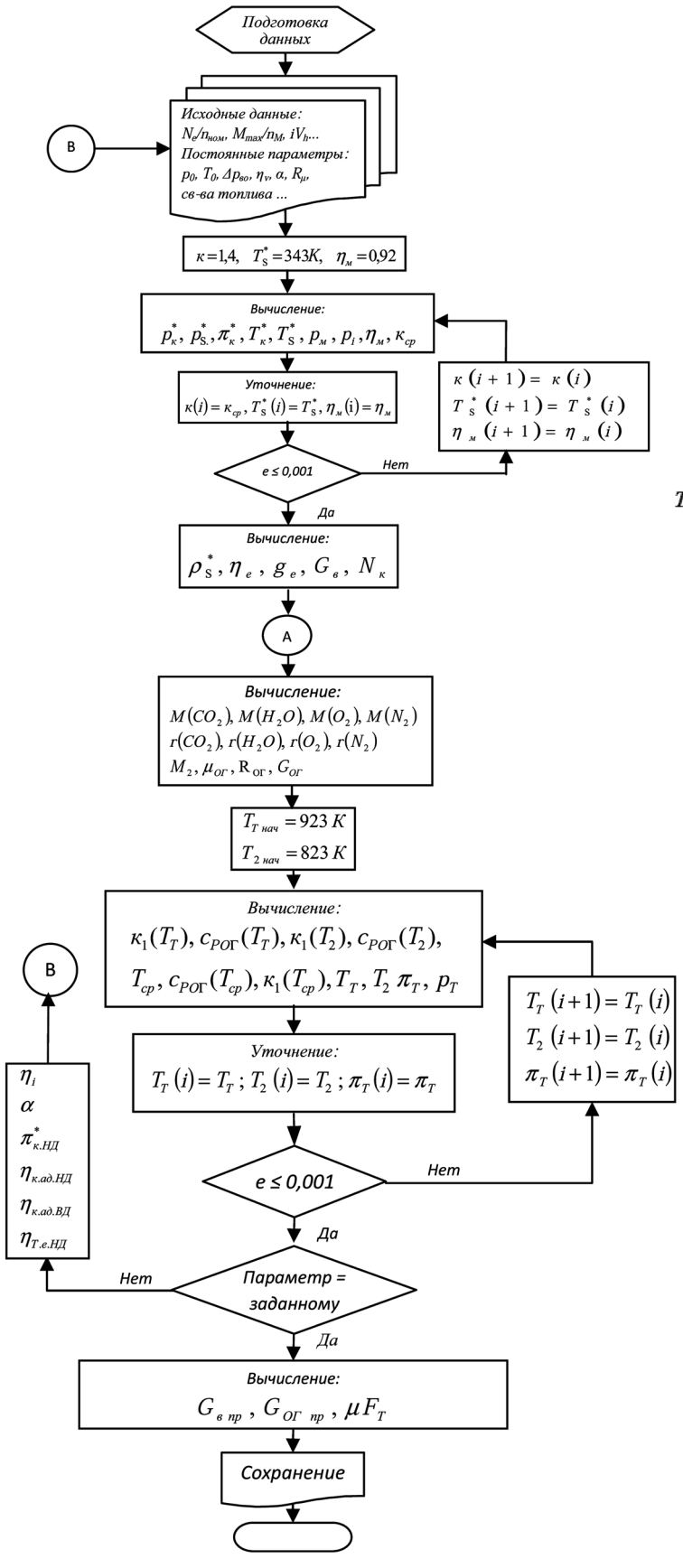

Рис. 2. Блок-схема программы «Параметры наддува дизеля»

На втором этапе по заданным параметрам ВСХ в расчетных точках последовательно решаются системы уравнений для определения необходимых параметров компрессора. Для определения необходимых параметров турбины вводится итерационный процесс, за критерий сходимости принимается мощностной баланс турбокомпрессора, а именно: равенство мощностей компрессора и турбины ($N_K = N_T$). В результате определяются параметры наддува, необходимые для конкретного двигателя.

Расчеты проводятся на базе известных газодинамических зависимостей.

Так система уравнений для условий на выходе из двигателя имеет вид:

$$T_T = \frac{1}{c_{P\,OГ}\left[1+\left(\frac{1}{\alpha\, l_0}\right)\right]}\left[\frac{H_U}{\alpha\, l_0}\left(1-\eta_i-q_W\right)+c_{PB}T_S\right]$$

$$G_{OГ} = G_B + G_T$$

$$N_K = N_T$$

$$\left(\frac{1}{\pi_T}\right)^{\frac{k_1-1}{k_1}} = 1-\frac{N_K}{G_{OГ}\,\eta_{TE}\,\frac{k_1}{k_1-1}R_{OГ}\,T_T}$$

$$\pi_T = \frac{p_T}{p_2}$$

$$T_2 = T_T\left[1-\left(\frac{1}{\pi_T}\right)^{\frac{k_1-1}{k_1}}\eta_{TE}\right]$$

T_T – температура газа перед турбиной,
p_T – давление газа перед турбиной,
$G_{OГ}$ – расход газа через турбину,
p_2 – давление газа после турбины,
q_W – относительная теплоотдача в стенки камеры сгорания и выхлопной коллектор,
c_{PB} – теплоёмкость воздуха при постоянном давлении,
k_1 – показатель адиабаты расширения в турбине,
$R_{OГ}$ – газовая постоянная продуктов сгорания,
$c_{POГ}$ – теплоёмкость отработавших газов при постоянном давлении,
$\mu c_{POГ}$, $\mu c_{VOГ}$ – молярная теплоёмкость отработавших газов при постоянном давлении и постоянном объёме,
μc_{Vi}, r_i – молярная теплоёмкость компонентов отработавших газов при постоянном объёме и их относительное объёмное содержание.

Система уравнений для условий на входе в двигатель:

$$p_S = \frac{R_\mu M_1 T_S}{\eta_V \eta_i \eta_M H_U}$$

$$p_K = p_S + \Delta p_{ОНВ}$$

$$\pi_K = \frac{p_K}{p_1}$$

$$T_K = T_0 \left[1 + \left(\pi_K^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{K\,АД}} \right]$$

$$\sigma_{ОНВ} = \frac{T_K - T_S}{T_K - T_{ОЖ\ ВХ}}$$

p_S – давление воздуха после ОНВ
p_K – давление воздуха после компрессора,
π_K – степень повышения давления в компрессоре,
T_S – температура воздуха после ОНВ,
T_K – температура воздуха после компрессора.

По результатам расчета проводится выбор характеристик ТКР и уточнение исходных данных. Протекание зависимости коэффициента избытка воздуха по внешней скоростной характеристике дизельного двигателя с нерегулируемым ТКР таково, что он уменьшается по мере снижения частоты вращения коленчатого вала. Поэтому влияние его на экономичность двигателя и качество отработавших газов становится значительным, и к выбору параметров наддува при низких частотах вращения предъявляются повышенные требования. Исходя из этого расчет необходимого давления наддува обычно начинается с режима максимального крутящего момента, для которого задается минимально допустимое значение коэффициента избытка воздуха. По результатам расчета, исходя из ограничения максимальной температуры газа перед турбиной 700 °С, уточняется коэффициент избытка воздуха α. Индикаторный КПД η_i уточняется из обеспечения заданного расхода топлива. При отсутствии заданного расхода топлива по ВСХ, используя эмпирическую зависимость η_i / α, уточняем индикаторный КПД η_i двигателя. Выбор эффективных параметров ТКР многократно уточняется в процессе итерации исходя из опытных универсальных характеристик ТКР. Определяются параметры наддува на режиме максимального крутящего момента и выбираются универсальные характеристики при заданной степени повышения давления, рассчитываются параметры наддува по ВСХ, принимая закон изменения исходных параметров от оборотов коленчатого вала и с учетом выбранных универсальных характеристик.

Основой данной методики является наличие у разработчиков базы данных (БД). В процессе создания базы данных использовался отечественный и мировой опыт создания многочисленных систем наддува в мире. Это – некоторая совокупность данных по теме в памяти компьютера, которая в соответствии с определёнными правилами и процедурами удобно используется для удовлетворения информационных потребностей разработчиков. БД условно разделена по тематическому принципу на следующие разделы:

1. Аналитические исследования мирового и отечественного опыта создания систем турбонаддува.
2. Параметры и конструкции ДВС.
3. Патенты ДВС и систем ТН.
4. Методы и результаты расчетов.
5. Методы испытаний, доводки и контроля.
6. Прочностные исследования и исследования ходовой части ТКР.
7. Конструкции систем наддува и элементов регулирования.
8. Реальные экспериментальные характеристики ТКР.
9. Реальные экспериментальные характеристики ДВС.
10. Технология производства систем ТН.

Это позволяет в процессе поиска решения сопоставлять на основе объективных критериев предлагаемые заказчику варианты с уже существующими примерами. Каждый значимый этап работы по представленной методике включает обращение к БД для осуществления определенных действий, таких как отбор необходимых констант и других параметров, сравнение полученных данных с содержащимися в БД, использование уже полученных эффективных решений в новых проектах полностью или частично и т.д.

В рамках данной методики компрессорная и турбинная ступень создается путем подбора известных характеристик из БД или применения метода масштабирования. При отсутствии в БД требуемой характеристики компрессорной и турбинной ступени, используя одну опытную характеристику, путем масштабирования по приведенному расходу воздуха $G_{в.пр.}$ и приведенному расходу газа $G_{Г.пр.}$ с сохранением параметров по адиабатическому и эффективному КПД, можно создать бесконечное множество характеристик, изменяя коэффициент масштабирования. В качестве модельного выбирается существующий компрессор и турбина из базы данных с известными характеристиками, которые удовлетворяют условиям согласования по параметрам степени сжатия ($\pi^*_к$ = $P^*_{к2}$ / $P^*_{к1}$, где $P^*_{к1}$ – полное давление на входе

в компрессор, $P^*_{к2}$ – полное давление на выходе из компрессора) и коэффициенту полезного действия ηк.ад (КПД) и параметрам степени расширения ($\pi_т = P^*_{т0} / P_{т2}$, где $P^*_{т0}$ – полное давление на входе в турбину, $P_{т2}$ – статическое давление на выходе из турбины) и КПД. При этом геометрия нового компрессора и турбины моделируется по расходу относительно модельного в большую или меньшую сторону.

Коэффициент моделирования выбирается с учетом обеспечения достаточных запасов устойчивой работы компрессора и прохождения линии совместной работы двигателя и ТКР в области максимальных КПД компрессора и турбины. Величина коэффициента моделирования рабочего колеса компрессора по расходу равна $m = G_{прн} / G_{прм}$, рабочего колеса турбины по расходу равна $m = G_{Г.ПР.Н} / G_{Г.ПР.М}$ по линейным размерам $l = \sqrt{m}$ На смоделированные характеристики компрессора и турбины накладывается расходная характеристика двигателя и проводится анализ применения данного решения к конкретному двигателю на всех режимах его работы (рис. 3, 4).

Определение диапазонов типоразмеров ТКР, внутри которых возможно масштабирование, проводилось на основе безразмерных критериев теории подобия и экспериментальных данных. Критерии подобия процессов в лопаточных машинах хорошо известны: показатель адиабаты, критерий Прандтля, критерий Фруда, число Маха, критерий Рейнольдса и $x = u / c$. При соблюдении этих критериев, а также геометрического подобия процессы в лопаточных машинах на реальном и модельном режимах будут подобны. При рассмотрении течения газа в компрессоре можно пренебречь действием сил земного притяжения (критерием Фруда), показателем адиабаты и критерием Прандтля. Зона автомодельности по критерию Рейнольдсу в лопаточных машинах лежит в диапазоне $Re_{авт} > 5 \times 10^5$. Значения критерия Рейнольдса в периферийных сечениях лопаточных машин турбокомпрессоров ТКР-40,50,60,100,200 находятся в диапазоне 3,5–17,3 (табл. 1) и соответственно не во всех ТКР из приведенной линейки имеет место автомодельность по критерию Рейнольдса.

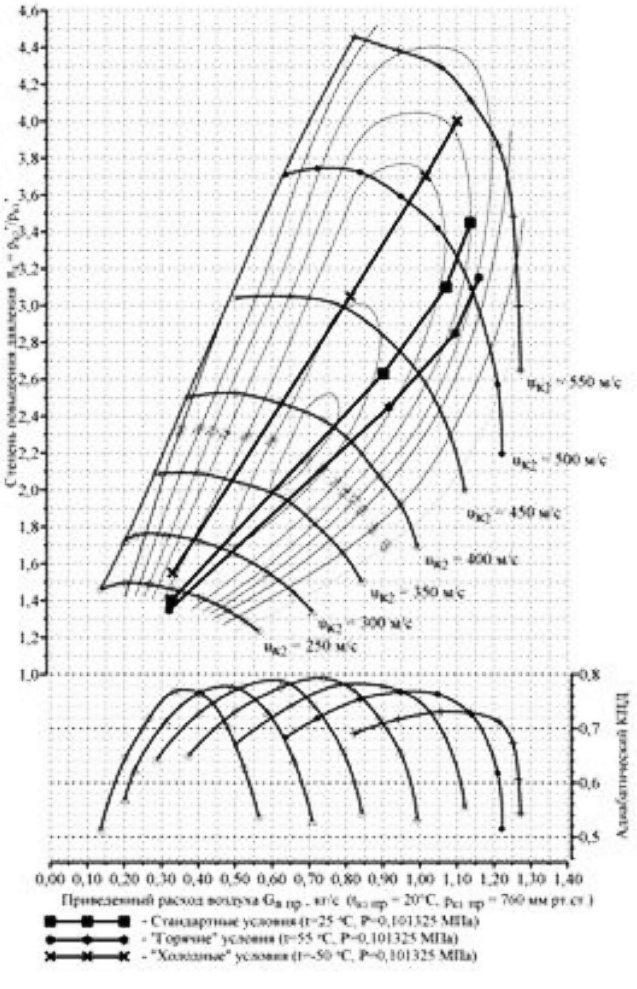

Рис. 3. Характеристика моделированного компрессора с расходными характеристиками двигателя

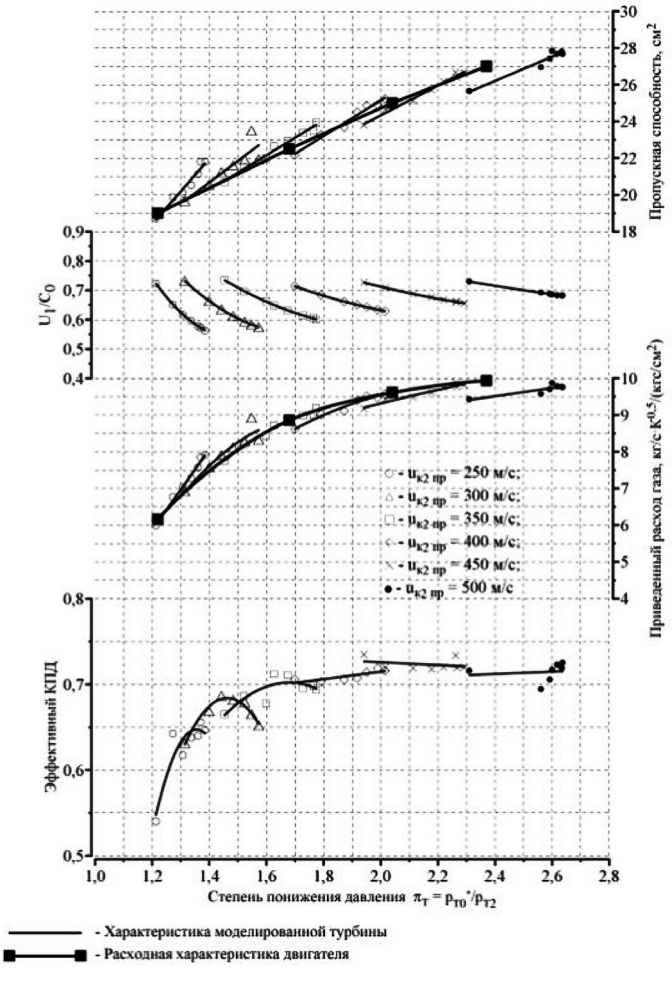

Рис. 4. Характеристика моделированной турбины с расходной характеристикой двигателя

Таблица 1

Максимальные величины чисел Рейнольдса в лопаточных машинах ТКР

№ п/п	Наименование ТКР	d_2 мм	$G_{в.пр.}$ кг/с	Re, 1×10^5
1	ТКР-40	40	0,01 – 0,1	3,47
2	ТКР-50	50	0,03 – 0,14	4,34
3	ТКР-60	60	0,06 – 0,28	5,21
4	ТКР-100	100	0,1 – 0,6	8,69
5	ТКР-200	200	0,8 – 2.4	17,35

Вместе с тем следует отметить, что наличие автомодельности по Рейнольдсу в одном сечении колеса не гарантирует отсутствия автомодельности в других местах проточной части лопаточной машины. В целом, как показывает практика проектирования турбокомпрессоров, строгое выполнение условия динамического подобия (Re, M, k) невозможно. Поэтому для уточнения и определения диапазонов масштабирования были сопоставлены и проанализированы различные варианты смоделированных и экспериментальных характеристик компрессора и турбины ТКР с диаметрами рабочих колес от 50 мм до 200 мм. В результате анализа было определено сохранение подобия с достаточно высокой точностью в диапазоне типоразмеров ТКР-50 – ТКР-70 и ТКР-60 – ТКР-200. В качестве примера приводится характеристика смоделированного компрессора и турбины ТКР-70.07, полученная в результате масштабирования существующего компрессора и турбины ТКР-50 (рис. 5, 6.), где видно близкое совпадение расчетной и экспериментальной характеристики.

С использованием вышеописанного метода моделирования компрессора, турбины и программно-вычислительного комплекса Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 строится трехмерная модель проточной части компрессорной и турбинной ступени.

Следующим этапом является разработка CAD модели ТКР. Используя описанную выше методику расчета и моделирования, получаем геометрические размеры ступеней и в результате выбирается типоразмер ТКР. Основным параметром типоразмера является диаметр колеса компрессора на выходе с шагом обозначений 10 мм. Подшипниковый узел внутри каждого типоразмера доведен и унифицирован, поэтому, согласно методике, при разработке CAD модели ТКР ходовая часть и подшипниковый узел принимаются стандартными и берутся из базы данных. Затем проектируются компрессорная и турбинная ступени с геометрическими параметрами,

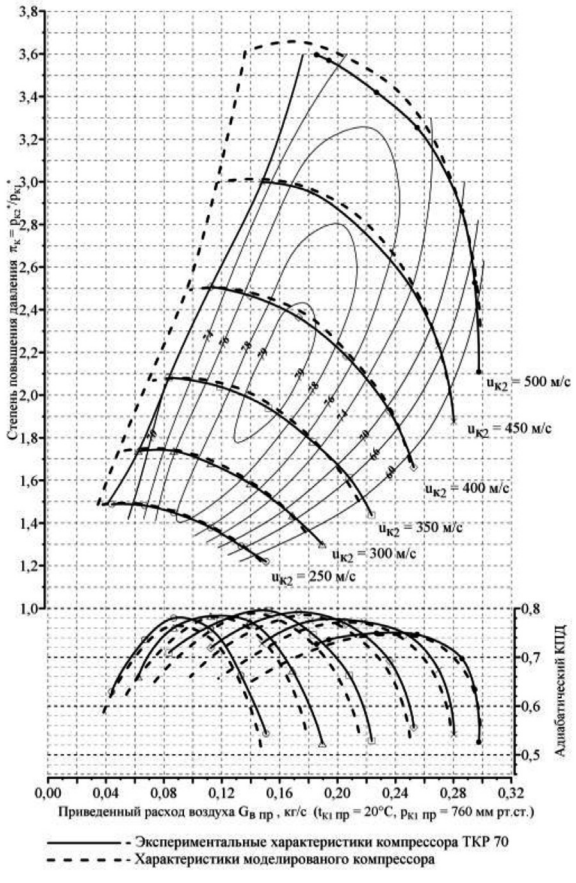

Рис. 5. Экспериментальная и моделированная характеристика компрессора ТКР 70.07

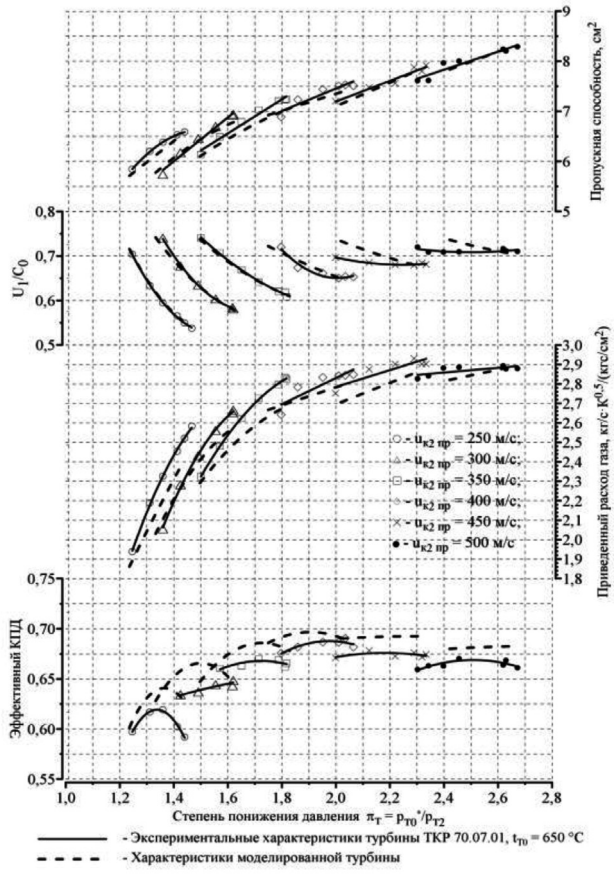

Рис. 6. Экспериментальная и моделированная характеристика турбины ТКР 70.07

полученными в результате моделирования. Исходя из требований проектных характеристик ДВС, выбирается способ регулирования и количество ступеней системы наддува. Важным моментом при разработке CAD модели является компоновка системы на двигателе, и если подшипниковый узел и геометрия ступеней могут быть зачастую унифицированы, то корпуса компрессора и турбины, как правило, уникальны и проектируются под конкретный двигатель исходя из его компоновки в моторном отсеке. В современных многоступенчатых системах, где газовые и воздушные каналы имеют сложную пространственную конструкцию, для оптимизации, проверки и уточнения параметров течения газов может понадобиться дополнительный CFD расчет системы и уточнение геометрических параметров ступеней ТКР.

После разработки CAD модели и выпуска конструкторской документации требуется изготовление опытных образцов. Современные технологии позволяют создавать опытные образцы ТКР методом прототипирования, где применяются современные аддитивные технологии для единичного производства конкретных деталей. Колесо компрессора может изготавливаться на 5-координатном обрабатывающем центре, а модель колеса турбины, как и корпусные детали ТКР, выращиваться в 3D принтере и затем отливаться в единичном экземпляре. Для проверки характеристик и принятия решения о запуске в производство изготовленный опытный образец ТКР необходимо испытать на специальном безмоторном стенде, при необходимости скорректировать конструкцию и затем провести испытания на двигателе. Исследование ТКР проводится на специальном стенде контрольных и исследовательских испытаний, разработанном и изготовленном в НПО «Турботехника».

Характеристики ТКР определяются при постоянных значениях окружной скорости на наружном диаметре лопаток колеса компрессора, приведенной к нормальным условиям, начиная с режима максимального расхода воздуха в сторону его уменьшения. При каждой окружной скорости на наружном диаметре лопаток колеса компрессора измеряются параметры работы ТКР не менее чем на шести режимах, приблизительно равномерно расположенных по расходу воздуха. Измерение параметров проводятся при установившемся режиме работы ТКР. Допускаемое отклонение частоты вращения ротора от заданного значения в процессе измерения параметров не должно быть более 100 мин$^{-1}$. Характеристики рассчитываются по абсолютным давлениям, равным алгебраической сумме измеренного избыточного и атмосферного давлений, и абсолютным температурам.

В результате испытаний характеристики ТКР представляются в виде графических зависимостей:

– степени повышения давления воздуха и адиабатического КПД компрессора от приведенного расхода воздуха через компрессор и приведенной окружной скорости на наружном диаметре колеса или частоты вращения ротора;

– эффективного КПД, приведенного расхода газа через турбину и пропускной способности турбины от степени уменьшения давления газа в турбине. По результатам испытаний оформляется и заносится в базу данных отчет, содержащий сведения об объекте, методе, средствах, условиях и результатах испытаний и заключение о соответствии параметров испытанного ТКР техническим требованиям.

С целью подтверждения данной методики в программной среде MentorGraphicsFloEFDCreo проведены трехмерные газодинамические расчеты, которые также показали хорошую сходимость расчетных и экспериментальных характеристик.

Сопоставление смоделированных и экспериментальных характеристик испытываемого ТКР, а также результатов трехмерного расчета компрессора и турбины показывает степень совпадения экспериментальных и расчетных параметров. При удовлетворительных показателях (не более 5% расхождения) после проведения безмоторных испытаний агрегат проходит испытания на двигателе на моторных стендах на заводах – изготовителей двигателей. В том числе и на стендах ведущих европейских инжиниринговых компаний, таких как AVL (Австрия) и FEV(Германия) и на предприятиях-заказчиках, которые подтверждают соответствие двигателей в комплектации с системами турбонаддува НПО «Турботехника» требованиям ТЗ и ТУ.

Данная методика легла в основу проектирования и внедрения в производство практически всех разработанных и поставленных на производство турбокомпрессоров в НПО «Турботехника», обеспечивающих требуемые параметры агрегатов и систем наддува для отечественных двигателей различного назначения.

Заключение

– При разработке представляемой методики был выполнен анализ российского и зарубежного опыта, включая методологию, по созданию и использованию систем наддува ДВС, который выявил потребность в создании современной методики разработки систем наддува.

– Разработана инженерная методика, позволяющая в сжатые сроки создать и поставить на производство системы наддува для двигателей различного назначения, включающая способы расчета

параметров наддува, моделирования ступеней турбокомпрессоров методом масштабирования, проведения безмоторных испытаний и определения диапазона типоразмеров ТКР, подлежащих масштабированию.

– Определены диапазоны масштабирования при моделировании компрессора и турбины. Весь модельный ряд турбокомпрессоров от ТКР 40 до ТКР-200 можно разбить на два диапазона, моделирование в которых обеспечивает достаточно высокую точность при моделировании. 1-й диапазон: ТКР-50 – ТКР-70, 2-й диапазон: ТКР 60-ТКР-200.

– Проведенные исследования показали, что при наличии широкой базы данных у разработчиков систем наддува, испытательных стендов и рассматриваемой методики при создании ТКР нет необходимости в использовании сложных трехмерных газодинамических расчетов.

– Данная методика применяется в НПО «Турботехника» при создании и постановке на производство широкой гаммы типоразмерного ряда турбокомпрессоров с диаметрами рабочих колес от 40 до 200 мм, обеспечивающей практически все выпускаемые и разрабатываемые отечественные двигатели.

Литература

1. *Каминский В. Н., Каминский Р. В., Ковальцов И. В., Сибиряков С. В., Корнеев С. А., Зайцев О. Г.* Стабилизация температуры газа и оборотов ротора на стенде контрольно-исследовательских испытаний турбокомпрессоров средствами автоматизации // Известия МГТУ МАМИ. М.: МГТУ «МАМИ». 2014. № 4 (22). Т. 1. С. 32–35.
2. *Лазарев А. В., Каминский В. Н., Каминский Р. В., Сибиряков С. В., Григоров И. Н., Костюков Е. А*. Результаты разработки регулируемого турбоэлектрокомпрессора // Известия МГТУ МАМИ. М.: МГТУ «МАМИ». 2014. № 4 (22). Т. 1. С. 47–50.
3. Разработка систем наддува для ДВС различного назначения // Известия МГТУ МАМИ. М.: МГТУ «МАМИ», 2014. № 4 (22). Т. 1 С. 22–26.
4. *Григоров И. Н., Каминский Р. В., Сибиряков С. В., Трофимович И. В*. Применение программного комплекса FloEFD для численного исследования характеристик турбокомпрессора // Известия МГТУ МАМИ. М.: МГТУ «МАМИ». 2013. № 2 (16). Т. 1. С. 154–157.
5. *Каминский Р. В., Ковальцов И. В., Корнеев С. А*. Программное и аппаратное обеспечение системы автоматизированного контроля параметров турбокомпрессоров // Известия МГТУ МАМИ. М.: МГТУ «МАМИ». 2013. № 2 (16). Т.1. С. 163–167.
6. Zhao H. (ed) (2010) Advanced direct injection combustion engine technologies and development. *Diesel engines*. V. 2.
7. *Лямцев Б. Ф., Микеров Л. Б.* Турбокомпрессоры для наддува двигателей внутреннего сгорания. Теория, конструкция и расчет: учебное пособие. Ярославль: Яросл. гос. техн. ун-т, 1995.
8. *Симсон А. Э., Каминский В. Н*. Турбонаддув высокооборотных дизелей. М.: Машиностроение, 1976.
9. *Шестаков Д. С*. Агрегаты наддува двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ. 2013.